Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 6, Feb.-Mar. 2025, p. 765-780

Projections of Temperature and Precipitation Changes under CMIP6 Scenarios in Sistan-va-Baluchestan Province

S. Mirshekari[1*], F. Yaghoubi[2], S.A. Hashemi[3]

1- Assistant Professor, Agriculture Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran
(*- Corresponding Author Email: Smirshekari@uoz.ac.ir)
2- Postdoctoral Researcher, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Hamoun International Wetland Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran

Received:	31-07-2024
Revised:	28-11-2024
Accepted:	31-12-2024
Available Online:	31-12-2024

How to cite this article:
Mirshekari, S., Yaghoubi, F., & Hashemi, S.A. (2025). Projections of temperature and precipitation changes under CMIP6 scenarios in Sistan-va-Baluchestan province. *Journal of Water and Soil, 38*(6), 765-780. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89164.1422

Introduction

The 21st century is witnessing the increase of climate change as an important challenge due to its destructive environmental and socio-economic effects. Extreme climatic conditions have become frequent and more intense in recent decades as a result of human activities. Iran, as one of the countries in the Middle East with a different climate in each region of the country, has suffered significant adverse effects of climate change. Considering the importance of the climate change, it is important to investigate the changes in climate variables to know the future conditions and make management decisions. In the field of climate research, global climate models are useful tools that are often used to investigate the global climate system, including historical and projected periods. Since the use of the CMIP6 dataset provides improved clarity and accuracy for predicting future climate forecasts, the main objective of the present study is to predict the temperature and precipitation changes in the near, mid, and far future in Sistan-va-Baluchestan province.

Materials and Methods

The minimum temperature, maximum temperature, and precipitation data of 10 general circulation models (GCMs) of the 6th IPCC report for the baseline (1990-2014) were downloaded from the Global Climate Research Program database (https://esgf-node.llnl.gov). Then GCMs were including ACCESS-CM2, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1-HR, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-CC, EC-Earth3-Veg-LR, INM-CM4-8, INM-CM5-0, MIROC6, and NorESM2-MM. Four statistical indicators including correlation coefficient (R^2), RMSE, Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and mean absolute error (MAE) were used to evaluate the performance of 10 GCMs. Based on the results obtained from the these indicators, the models that had higher performance in predicting the temperature and precipitation data were selected as the best models for forecasting in the future. The ensemble of these models under two SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios for the near, middle, and far future (2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100) were extracted from the World Climate Research Program database.

CMhyd (Climate Model data for hydrologic modeling) tool was used to bias correction climate data of the selected models. In order to choose the best bias correction method, the R^2, RMSE, NSE, and MAE were estimated.

After bias correction, the climate data of selected models were ensembled and then the changes in precipitation and maximum and minimum temperature in three future periods compared to the baseline was estimated.

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89164.1422

Results and Discussion

The results showed that out of 10 GCMs, seven models had good performance (R^2 > 0.40, 4.23 < RMSE < 12.02°C, 0.12 < NSE < 0.74, and 3.36 < MAE < 9.59°C) in simulating daily minimum and maximum temperature. However, the performance of all models in simulated daily precipitation was poor (R^2 > 0.19, 1.24 < RMSE < 3.70 mm, -7.41 < NSE < -0.57, and 0.23 < MAE < 0.85 mm).

Among the different bias correction methods of temperature and precipitation available in CMhyd, the distribution mapping method had the best performance.

In all three regions, compared to the baseline, the average annual minimum and maximum temperature under two scenarios will increase in the future periods and precipitation will decrease in most periods and scenarios. These changes will be mainly in the SSP5-8.5 scenario compared to SSP2-4.5 and also in the far future period compared to the middle and near future. Averaged across all locations, annual maximum temperature showed increases in near, middle, and far projected periods of 1.3, 2.1, and 2.8°C under SSP2-4.5 and 1.6, 3.1, and 5.1°C under SSP5-8.5, respectively (Fig. 2), while for minimum temperature, the increases will be of 1.6, 2.6, and 3.4°C for SSP2-4.5 and 1.9, 3.9, and 6.3°C for SSP5-8.5. The range of annual precipitation among all sites was from –58.22 to 49.33% under SSP5-8.5 in the near and far future periods in Zabol and Iranshahr, respectively.

The annual increase in the average maximum and minimum temperature will be mainly due to the increase in air temperature in the months of January, February, August, September, October, November and December. The annual decrease in precipitation will mainly result from the decrease in precipitation in January, February, March, November, and December, and the annual increase in precipitation will result from the significant increase in precipitation in May and October compared to the baseline.

Conclusion

The results showed that under different scenarios of climate change, the maximum and minimum temperatures in the near, middle, and far future periods will face an increase compared to the baseline. However, the precipitation changes in the future time periods are not the same as compared to the baseline, and in some periods the precipitation will decrease and in others it will increase. But in general, the decrease in precipitation will be more than its increase. Therefore, it is very important to formulate and implement appropriate management programs for the needs of each region, in order to properly manage water resources and adapt to extreme temperatures and their consequences.

Keywords: Bias correction, Climate change, CMhyd, Maximum temperature, Minimum temperature

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۳، ص. ۷۸۰-۷۶۵

پیش‌نگری تغییرات دما و بارندگی تحت سناریوهای CMIP6 در استان سیستان و بلوچستان

سمیه میرشکاری [۱*] - فاطمه یعقوبی [۲] - سید ابوالفضل هاشمی [۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

چکیده

تغییر اقلیم به‌دلیل تأثیرات مخرب زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی آن به مهم‌ترین چالش در قرن بیست و یکم تبدیل شده است. در این مطالعه، ۱۰ مدل گردش عمومی از ششمین گزارش IPCC جهت پیش‌نگری تغییرات بارندگی و دما در سه منطقه ایرانشهر، زابل و زاهدان در استان سیستان و بلوچستان مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس روش‌های مختلف تصحیح اریبی در CMhyd ارزیابی شدند و با استفاده از روشی که از کارایی بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار بود، بارندگی و دمای حداکثر و حداقل مدل‌های منتخب برای سه دوره زمانی در آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تصحیح گردیدند. داده‌های تصحیح اریبی‌شده مدل‌های منتخب میانگین‌گیری شده و سپس تغییرات آن‌ها در دو مقیاس ماهانه و سالانه در سه دوره آینده نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۴) موردارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از ۱۰ مدل مورد مطالعه، ۸ مدل از کارایی خوبی (R^2 > ۰/۴۰، ۱۲/۰۲ > RMSE > ۴/۲۳ درجه‌سانتی‌گراد، ۰/۷۴ > NSE > ۰/۱۲، ۹/۵۹ > MAE > ۳/۳۶ درجه‌سانتی‌گراد) در شبیه‌سازی دمای حداقل و حداکثر روزانه برخوردار بودند. بااین‌حال، کارایی تمامی مدل‌ها در شبیه‌سازی‌شده بارندگی روزانه ضعیف بود (R^2 > ۰/۱۹، ۳/۷۰ > RMSE > ۱/۲۴ میلی‌متر، ۰/۵۷- > NSE > ۷/۴۱-، ۰/۸۵ > MAE > ۰/۲۳ میلی‌متر). از بین روش‌های مختلف تصحیح اریبیِ دما و بارندگی موجود در CMhyd، روش نقشه‌برداری توزیع دما و بارش بهترین عملکرد را داشتند و سبب بهبود کارایی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی گردیدند. به‌طور میانگین در همه مکان‌ها، دمای حداکثر سالانه در دوره‌های پیش‌بینی‌شده نزدیک، میانه و دور به‌ترتیب ۱/۳، ۲/۱، و ۲/۸ درجه سانتی‌گراد تحت SSP2-4.5 و ۱/۶، ۳/۱، و ۵/۱ درجه‌سانتی‌گراد تحت SSP5-8.5 افزایش نشان خواهد داد. درحالی‌که برای دمای حداقل، میزان افزایش ۱/۶، ۲/۶، و ۳/۴ درجه‌سانتی‌گراد برای SSP2-4.5 و ۱/۹، ۳/۹، و ۶/۳ درجه‌سانتی‌گراد برای SSP5-8.5 خواهد بود. بارندگی سالانه در تمامی مکان‌ها بین ۵۸/۲۲- تا ۴۹/۳۳ درصد نسبت به دوره پایه تحت سناریوی SSP5-8.5 به‌ترتیب در دوره‌های آینده نزدیک و دور در زابل و ایرانشهر متغیر خواهد بود. افزایش سالانه در میانگین دمای حداکثر و حداقل عمدتاً ناشی از افزایش دمای هوا درماه‌های ژانویه، فوریه، آگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر خواهد بود. کاهش سالانه بارندگی نیز عمدتاً از کاهش بارندگی درماه‌های ژانویه، فوریه، مارچ، نوامبر و دسامبر و افزایش سالانه بارندگی از افزایش قابل‌توجه بارندگی در ماه‌های می و اکتبر نسبت به دوره پایه ناشی خواهد شد. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند به بهبود درک ما از اثرات تغییر اقلیم بر منطقه موردمطالعه کمک کند و برنامه‌ریزان و ذینفعان را تشویق کند تا راهبردهای بهینه برای کاهش اثرات منفیِ آن را شناسایی کنند.

واژه‌های کلیدی: تصحیح اریبی، تغییر اقلیم، دمای حداقل، دمای حداکثر، CMhyd

۱- استادیار گروه زراعت، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران
(*- نویسنده مسئول، Email: Smirshekari@uoz.ac.ir)
۲- پژوهشگر پسادکتری، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89164.1422

مقدمه

قرن بیست‌ویکم شاهد افزایش تغییرات اقلیمی به‌عنوان یک چالش مهم به‌دلیل اثرات مخرب زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادیِ آن است. شرایط اقلیمی حدی در دهه‌های اخیر در نتیجه فعالیت‌های انسانی مکرر و شدیدتر شده است (Mukheef *et al*., 2024). این فعالیت‌ها مانند سوزاندن سوخت‌های فسیلی، آلودگی‌های صنعتی، تغییر کاربری زمین و افزایش جمعیت، منجر به افزایش حجم گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در اتمسفر و در نتیجه الگوهای اقلیمی غیرعادی گردیده است (Muhaisen *et al*., 2024). براساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم[1] (IPCC, 2020) غلظت گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان، مانند اکسیدنیتروژن، دی‌اکسیدکربن و متان درنتیجه گسترش اقتصاد و افزایش جمعیت به‌شدت افزایش یافته است. از اواسط قرن بیستم، گرمایش مشاهده‌شده بیشتر ناشی از اثرات تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای است که در سراسر سیستم آب و هوایی شناسایی شده است. بنابراین، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای راه اصلی کنترل تغییرات اقلیمی خواهد بود؛ زیرا این اقدامات، زمانی‌که با سازگاری ترکیب شوند، می‌توانند خطرات ناشی از آن را کاهش دهند (Faisal *et al*., 2023Rashid *et al*., 2022 ;).

در زمینه تحقیقات اقلیمی، مدل‌های آب و هوای جهانی ابزارهای مفیدی هستند که اغلب برای تحقیق در مورد سیستم اقلیمی در سراسر جهان، شامل دوره‌های تاریخی و پیش‌بینی‌شده، استفاده می‌شوند (Mohsen *et al*., 2020). از سال ۱۹۹۵ تاکنون، محققان بسیاری از مؤسسات در سراسر جهان به‌طور مداوم برای توسعه مدل‌های گردش عمومی جهت تولید مدل‌های قابل‌اعتماد و کارآمد برای شبیه‌سازی سیستم‌های اقلیمی کار کرده‌اند (Kamworapan *et al*., 2021 ;Hassan, 2021). درحال‌حاضر، هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اقلیمی (CMIP6[2]) را منتشر کرده است که در آن سناریوهای جدید انتشار و کاربری زمین تحت ویژگی‌های جدید توسعه اجتماعی، یعنی مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSPs[3]) در نظر گرفته شده‌اند (Mukheef *et al*., 2024). از زمانی‌که پیش‌بینی‌های اقلیمی CMIP6 در سال ۲۰۱۶ در دسترس قرار گرفت، چندین مطالعه (Yang *et al*., 2021; Bağçaci *et al*., 2021; Monteverde *et al*., 2022) این پایگاه داده را ارزیابی کرده‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که سناریوهای جدید اقلیمی CMIP6 نتایج قابل‌قبول‌تری نسبت به سناریوهای مسیرهای تمرکز نماینده (RCPs[4]) ارائه می‌دهند. CMIP6 از پیشرفت‌های قابل‌توجهی نسبت به CMIP5 برخوردار است، از جمله این واقعیت که مدل‌های CMIP6 از وضوح بالاتری برخوردار هستند که امکان پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات اقلیمی منطقه را فراهم می‌کنند. بااین‌حال، در سطح معینی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدل‌های CMIP6 دمای جهانی را کمی بالاتر از CMIP5 پیش‌بینی می‌کنند (Mukheef *et al*., 2024).

ایران به‌عنوان یکی از کشورهای خاورمیانه با آب و هوای متفاوت در هر منطقه از کشور، اثرات نامطلوب قابل‌توجهی از تغییرات اقلیمی متحمل شده است. چندین تحقیق در مورد تغییرات اقلیمی در مناطق مختلف ایران که از نتایج حاصل از مدل‌های گردش عمومی استفاده کرده‌اند انجام شده است. میان‌آبادی و همکاران (Mianabadi *et al*., 2023) تغییرات بارندگی و دما را در کرمان برمبنای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در دوره ۲۱۰۰-۲۰۵۱ موردبررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر عدم معنی‌داری در روند و میانگین بارندگی بود، درحالی‌که روند تغییرات و میانگین دما از نظر آماری معنی‌دار بود. همچنین آن‌ها نشان دادند که احتمال وقوع تنش‌های گرمایی در آینده افزایش خواهد یافت. عبدالعلی‌زاده و همکاران (Abdolalizadeh *et al*., 2023) در مطالعه‌ای به ارزیابی متغیرهای بارندگی و دما در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های CMIP6 تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در دوره‌های آینده ۲۰۳۱-۲۵۵ و ۲۰۷۱-۲۰۹۵ پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که میانگین دمای منطقه موردمطالعه در هر دو دوره آینده تحت هر دو سناریوها نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) افزایش و بارندگی کاهش خواهد یافت. قربانی مینائی و همکاران (Ghorbani Minaei *et al*., 2024) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند بارندگی و دما در سه دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ در حوضه قره‌سو با استفاده از مدل‌های CMIP6 پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که داده‌های میانگین سالانه متغیرهای دمای حداقل و حداکثر برمبنای سناریوی SSP2-4.5 در دوره آینده نزدیک و میانه و برای سناریوی SSP5-8.5 در هر سه دوره آینده دارای روند افزایشی معنی‌دار است. بااین‌حال روند میانگین سالانه بارندگی با وجود عدم معنی‌دار بودن در برخی موارد افزایشی و در برخی کاهشی بود.

باتوجه‌به اهمیت بروز پدیده تغییر اقلیم، بررسی تغییر در متغیرهای اقلیمی برای آگاهی از شرایط آینده و اتخاذ تصمیمات مدیریتی دارای

1- Intergovernmental Panel on Climate Change
2- Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
3- Shared Socio-economic Pathways
4- Representative Concentration Pathways

اهمیـت مـی‌باشـد. بـااین‌وجـود تـاکنون تحقیقـی در مورداسـتفاده از مجموعه داده‌های CMIP6 برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینـده در استان سیستان و بلوچستان انجام نشده است. ازآن‌جایی‌که اسـتفاده از مجموعه داده CMIP6 وضوح و دقت بهبودیافته‌ای را برای پیش‌بینی پیش‌نگری‌های اقلیمی آینده فراهم می‌کند، هدف اصلی مطالعه حاضر پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی دما و بـارش در آینـده نزدیـک، میانه و دور برای این منطقه خشک تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی است.

مواد و روش‌ها

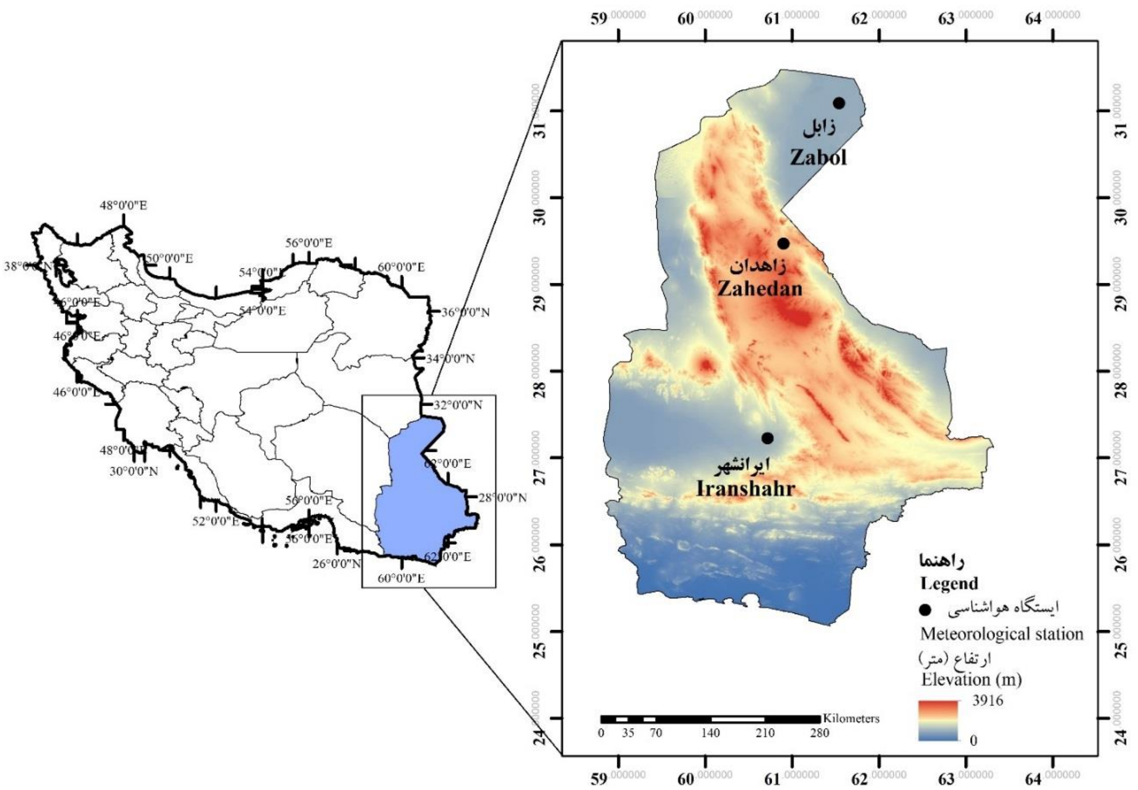
منطقه موردمطالعه

مناطق موردمطالعه در این تحقیق شامل سه شهر ایرانشهر، زابـل و زاهـدان واقـع در اسـتان سیسـتان و بلوچسـتان و در مختصـات جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شـمالی و ۵۸ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی می‌باشند (شکل ۱ و جـدول ۱). ایـن اسـتان بـا حـدود ۱۸۰۷۲۶ کیلومترمربـع وسعت، دومین استان پهناور کشور بوده که بیش از ۱۱ درصد وسـعت ایران را دربر می‌گیرد.

داده‌های مورداستفاده

داده‌های آب و هوایی مشاهداتیِ دمای حـداقل، دمـای حـداکثر و بارندگی در مقیاس زمانی روزانه برای سه ایسـتگاه ایرانشـهر، زابـل و زاهدان در دوره زمانی ۱۹۹۰ تـا ۲۰۱۴ از سـازمان هواشناسـی کشـور دریافت شد. جهت دریافت داده‌های اقلیمی آینده از داده‌های مدل‌های گردش عمومی CMIP6 استفاده گردیـد. انتخـاب مـدل‌هـا برمبنـای مقیاس زمانی روزانه، قدرت تفکیک مکـانی حـداکثر ۲۰۰ کیلـومتر و موجود بودن داده‌ها برای سـناریوهای مـدنظر (SSP2-4.5 و SSP5-8.5) انجام شد.

بـر ایـن مبنـا ۱۰ مـدل شـامل ACCESS-CM2، CMCC-ESM2، CNRM-CM6-1-HR، CNRM-ESM2-1، EC-Earth3-CC، EC-Earth3-Veg-LR، INM-CM4-8، INM-CM5-0، MIROC6 و NorESM2-MM انتخـاب شـدند کـه اطلاعات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. داده‌هـای دمـای حـداقل، دمای حداکثر و بارندگی این مدل‌ها برای دوره پایه (۲۰۱۴–۱۹۹۰) از پایگـاه برنامـه جهـانی تحقیقـات اقلیمـی (https://esgf-node.llnl.gov) دانلود شدند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های موردمطالعه

Figure 1- Geographical location of the study area and stations

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک موردمطالعه

Table 1- Characteristics of the studied synoptic stations

ایستگاه سینوپتیک Synoptic station	ارتفاع Elevation (m)	عرض جغرافیایی Latitude (decimal degrees)	طول جغرافیایی Longitude (decimal degrees)	دوره آماری Weather data period
ایرانشهر Iranshahr	591.1	27.23	60.72	1990–2014
زابل Zabol	489.2	31.09	61.54	1990–2014
زاهدان Zahedan	1370.0	29.47	60.90	1990–2014

جدول ۲- مدل‌های گردش کلی مورداستفاده و قدرت تفکیک مکانی آن‌ها

Table 2- The used GCMs and their spatial resolution

نام مدل Model name	کشور Country	قدرت تفکیک افقی Horizontal resolution (in degrees) طول جغرافیایی Longitude	 عرض جغرافیایی Latitude
ACCESS-CM2	Australia	1.88	1.25
CMCC-ESM2	Italy	1.25	0.94
CNRM-CM6-1	France	1.41	1.41
CNRM-ESM2-1	France	1.41	1.41
EC-Earth3-CC	Europe	0.70	0.70
EC-Earth3-Veg-LR	Europe	1.13	1.13
INM-CM4-8	Russia	2.00	1.50
INM-CM5-0	Russia	2.00	1.50
KACE-1-0-G	South Korea	1.88	1.25
MIROC6	Japan	1.41	1.41
NorESM2-MM	Norway	1.25	0.94

سپس این داده با استفاده از بسته نرم‌افزاری ncdf4 نـرم‌افـزار R برای مناطق موردمطالعه در قالب فایل‌های Excel استخراج گردیدند.

ارزیابی مدل‌های اقلیمی و انتخاب مدل‌های برتر

جهت بررسی کارایی ۱۰ مـدل اقلیمـی از شـاخص‌هـای ارزیـابیِ ضریب تبیین (R^2)، مجذور میـانگین مربـع خطـا (RMSE[1])، کـارایی نـش-سـاتکلیف (NSE[2]) و میـانگین خطـای مطلـق (MAE[3]) (معادله‌های ۱ تا ۴) استفاده شد (Mukheef *et al*., 2024):

$$R^2=\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})(O_i-\bar{O})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \quad (۱)$$

$$\text{RMSE}=\sqrt{1/n\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2} \quad (۲)$$

$$NSE=1-\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}\right] \quad (۳)$$

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|O_i-P_i\right| \quad (۴)$$

بر مبنای نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌هـا، مـدل‌هـایی کـه از کارایی بالاتری در پیش‌بینی داده‌های دما و بارندگی برخـوردار بودنـد به‌عنوان مدل‌های منتخب جهت پیش‌نگری در آینده تعیین گردیدنـد. سپس داده‌های این مدل‌ها تحت دو سـناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای سه دوره زمانی در آینـده نزدیـک، میانـه و دور (بـه‌ترتیـب ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶) از پایگاه برنامه جهـانی تحقیقات اقلیمی استخراج گردیدند.

تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی

جهت تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی مدل‌های منتخب از نرم‌افزار CMHyd[4] استفاده شد. CMhyd یک نـرم‌افـزار مـدل‌سـازی بـرای تصحیح و حذف اریبی‌هـا از داده‌هـای اقلیمـی آینـده مـی‌باشـد. ایـن

1- Root mean square error
2- Nash-Sutcliffe efficiency
3- Mean absolute error

4- Climate Model data for hydrologic modeling

نرم‌افزار به‌دلیل برخورداری از روش‌های گوناگون تصحیح اریبی و اجرای سریع روش‌های منتخب، به‌عنوان مدلی کارا جهت ریزمقیاس‌نمایی برونداد مدل‌های CMIP6 در مطالعات مختلف به‌کاررفته است. در این مطالعه، داده‌های هر یک از مدل‌ها برای دوره ۱۹۹۰–۲۰۱۴ با استفاده از روش‌های تصحیح اریبی بارندگی شامل مقیاس‌گذاری خطی[1]، تصحیح تغییر دلتا[2]، مقیاس‌گذاری شدت بارش محلی[3]، تبدیل توان بارش[4] و نقشه‌برداری توزیع بارش[5] و روش‌های تصحیح اریبی دمای حداقل و حداکثر شامل مقیاس‌گذاری خطی، تصحیح تغییر دلتا، مقیاس‌گذاری واریانس دما[6] و نقشه‌برداری توزیع دما[7] (Teutschbein & Seibert, 2012) تصحیح شدند. سپس با استفاده از شاخص‌های ارزیابیِ ضریب تبیین R^2، RMSE، NSE و MAE (معادله‌های ۱ تا ۴) بهترین روش تصحیح اریبی انتخاب و داده‌های سه دوره آینده برای هر یک از مدل‌های اقلیمی با استفاده از آن روش موردتصحیح قرار گرفتند.

در این معادلات، O_i بیانگر مقدار مشاهده‌شده، P_i مقدار پیش‌بینی‌شده، n تعداد کل داده‌ها و $\bar{O}$ و $\bar{P}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده میانگین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده هستند.

ایده‌آل‌ترین مقدار RMSE و MAE صفر است و هرچه مقدار آن کمتر باشد نشان از برتری روش مورداستفاده دارد و هرچه مقدار آن بزرگ‌تر باشد بیانگر خطای بیشتر مدل است (Willmott, 1981). NSE بین منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است (Nash & Sutcliffe, 1970).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های اقلیمی مدل‌های منتخب پس از تصحیح اریبی میانگین‌گیری‌شده و سپس میزان تغییرات در آن‌ها در دوره‌های آینده (۲۰۲۶–۲۰۵۰، ۲۰۵۱–۲۰۷۵ و ۲۰۷۶–۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰–۲۰۱۴) سنجیده شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار R و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Origin 2024 صورت گرفت.

1- Linear scaling
2- Delta-change correction
3- Precipitation local intensity scaling
4- Power transformation of precipitation
5- Distribution mapping of precipitation
6- Variance scaling of temperature
7- Distribution mapping of temperature

نتایج و بحث

ارزیابی مدل‌های اقلیمی و انتخاب مدل‌های برتر

نتایج ارزیابی کارایی مدل‌های اقلیمی (جدول‌های ۳ و ۴) بیانگر کارایی متفاوت این مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و بارندگی بود. این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت استفاده از مدل‌های بیشتر در مطالعات تغییر اقلیم و اکتفا نکردن به تفکیک افقی مدل‌ها جهت گزینش آن‌ها است. در بین مدل‌های موردبررسی، از نظر شبیه‌سازی دمای حداکثر، بهترین کارایی را مدل INM-CM5-0 برای ایرانشهر و زاهدان و مدل NorESM2-MM برای زابل داشت. مدل CMCC-ESM2 بهترین کارایی را در شبیه‌سازی دمای حداقل برای ایرانشهر و زابل و مدل EC-Earth3-Veg-LR بهترین کارایی را برای زاهدان داشت. مدل INM-CM4-8 برای ایرانشهر و مدل ACCESS-CM2 برای زابل و زاهدان از بهترین کارایی در شبیه‌سازی بارندگی روزانه نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار بودند. اشرف و همکاران (Ashraf *et al.*, 2013) بیان داشتند که در یک منطقه الزاماً یک مدل یکسان، بهترین پیش‌بینی را برای تمام متغیرهای اقلیمی ارائه نمی‌دهد و لذا ممکن است دقیق‌ترین پیش‌بینی برای متغیرهای بارندگی و دمای آن منطقه توسط دو مدل مختلف ایجاد گردد.

به‌طورکلی تمامی مدل‌های موردبررسی به‌جز CNRM-CM6-1-HR برای شهر زابل و MIROC6 برای هر سه شهر از کارایی خوبی (۰/۴۰ < R^2 < ۰/۷۴، ۴/۲۳ < RMSE < ۱۲/۰۲ درجه‌سانتی‌گراد، ۰/۱۲ < NSE، ۳/۳۶ < MAE < ۹/۵۹ درجه‌سانتی‌گراد) در شبیه‌سازی دمای حداکثر و حداقل برخوردار بودند (جدول ۳). باتوجه‌به قدرت تفکیک افقی مدل‌های CNRM-CM6-1-HR و MIROC6 در مقایسه با سایر مدل‌های موردمطالعه (جدول ۲) می‌توان بیان داشت که قدرت تفکیک افقی کمتر یک مدل نمی‌تواند به‌تنهایی موجب عدم قطعیت بالای آن گردد. علاوه‌بر قدرت تفکیک افقی ضعیف، خطاها و عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در برآورد دما در ایران می‌توانند ناشی از پامترسازی ضعیف مدل‌ها و کمبود داده‌های مشاهداتی به‌عنوان ورودی مدل‌ها باشد (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022). لذا قدرت تفکیک افقی به‌تنهایی نمی‌تواند معیار مناسبی برای انتخاب مدل در نظر گرفته شود. بااین‌حال، یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2021) همبستگی معنی‌داری بین کارایی مدل‌های CMIP6 و قدرت تفکیک آن‌ها گزارش نمودند.

تمامی مدل‌های موردبررسی از کارایی بسیار ضعیفی (R^2 < ۰/۱۹، ۱/۲۴ < RMSE < ۳/۷۰ میلی‌متر، −۷/۴۱ < NSE < −۰/۵۷، ۰/۲۳ < MAE < ۰/۸۵ میلی‌متر) در شبیه‌سازی بارندگی در تمام مناطق برخوردار بودند (جدول ۴) که در این بین، مدل‌های CNRM-CM6-1-HR، CNRM-ESM2-1 و MIROC6 کارایی ضعیف‌تری داشتند. لذا استفاده از داده‌های بارندگی مدل‌ها برای کاربردهای

هیدرولوژیکی بدون ریزمقیاس‌نمایی و تصحیح اریبی می‌تواند منجر به نتایج غیرمنطقی شود. لازم به ذکر است که باتوجه‌به تغییرات بسیار زیاد مکانی و زمانی بارندگی، مدل‌های اقلیمی توانایی بالایی در شبیه‌سازی این داده‌ها ندارند که این نتیجه در توافق با سایر مطالعاتی است که در این زمینه انجام شده است (Yang *et al*., 2021; Abdolalizadeh *et al*., 2023; Rashidi Ghane *et al*., 2023; GhorbaniMinaei *et al*., 2024). یزدان‌دوست و همکاران (Yazdandoost *et al*., 2021) بیان داشتند که شبیه‌سازی‌های مدل‌ها هنوز بسیار نامشخص هستند و قبل از استفاده از شبیه‌سازی‌ها در مطالعات ارزیابی تغییرات اقلیمی، درک خوب خطاها و سوگیری‌های اساسی ضروری است.

در بین مناطق، برای تمامی پارامترها بهترین کارایی به‌ترتیب برای ایرانشهر، زابل و زاهدان حاصل شد (جدول‌های ۳ و ۴). علت این امر می‌تواند قرارگیری زاهدان در شبکه‌ای با توپوگرافی پیچیده (پستی‌وبلندی زیاد) باشد (شکل ۱). زیرا زمانی‌که در یک شبکه، توپوگرافی یکنواخت نباشد (به‌ویژه در مناطق کوهستانی) داده‌های شبیه‌سازی‌شده به‌طورقابل‌توجهی متفاوت از داده‌های ایستگاهی ثبت‌شده برای آن منطقه خواهد بود (Van Wart *et al*., 2015).

باتوجه‌به کارایی ضعیف مدل‌های CNRM-CM6-1-HR و MIROC6 در شبیه‌سازی دما و CNRM-CM6-1-HR، CNRM-ESM2-1 و MIROC6 در شبیه‌سازی بارندگی (جدول‌های ۳ و ۴)، از بین ۱۰ مدل مورد بررسی، ۷ مدل شامل ACCESS-CM2، CMCC-ESM2، EC-Earth3-CC، EC-Earth3-Veg-LR، INM-CM4-8، INM-CM5-0 و NorESM2-MM به‌عنوان مدل‌های برتر جهت تصحیح اریبی و ارزیابی میزان تغییرات دما و بارندگی انتخاب شدند.

جدول ۳- شاخص‌های کارایی آماری ارزیابی داده‌های دمای حداکثر و حداقل مدل‌های اقلیمی

Table 3- Indicators of statistical performance in evaluating maximum and minimum temperature data from climate models

ایستگاه Station	مدل Model	دمای حداکثر Tmax R^2	RMSE (°C)	NSE	MAE (°C)	دمای حداقل Tmin R^2	RMSE (°C)	NSE	MAE (°C)
ایرانشهر Iranshahr	ACCESS-CM2	0.52	6.09	0.48	4.84	0.58	5.43	0.56	4.46
	CMCC-ESM2	0.63	5.36	0.63	4.12	0.75	4.23	0.73	3.36
	CNRM-CM6-1-HR	0.01	8.80	-0.01	7.35	0.16	7.72	0.06	8.71
	CNRM-ESM2-1	0.46	6.06	0.14	5.66	0.46	7.22	0.27	6.20
	EC-Earth3-CC	0.62	5.45	0.60	4.11	0.41	5.91	0.12	6.78
	EC-Earth3-Veg-LR	0.42	6.24	0.31	4.91	0.44	6.99	0.14	7.91
	INM-CM4-8	0.68	4.94	0.63	3.87	0.48	7.13	0.18	7.98
	INM-CM5-0	0.71	4.70	0.70	3.71	0.50	6.82	0.15	7.74
	MIROC6	-0.75	11.63	-0.73	9.80	0.70	4.61	0.67	3.74
	NorESM2-MM	0.58	5.69	0.56	4.70	0.69	4.67	0.63	3.78
زابل Zabol	ACCESS-CM2	0.59	6.62	0.53	5.14	0.75	4.97	0.73	3.93
	CMCC-ESM2	0.68	5.85	0.62	4.56	0.78	4.63	0.46	3.68
	CNRM-CM6-1-HR	0.54	6.94	0.54	5.36	0.72	5.19	0.70	4.12
	CNRM-ESM2-1	0.62	6.33	0.61	4.92	0.74	5.08	0.73	4.00
	EC-Earth3-CC	0.65	6.08	0.63	4.77	0.73	5.13	0.74	4.03
	EC-Earth3-Veg-LR	0.61	6.60	0.59	4.73	0.47	12.02	0.49	9.59
	INM-CM4-8	0.68	5.79	0.63	4.54	0.49	9.76	0.46	8.54
	INM-CM5-0	0.71	5.54	0.70	4.37	0.42	9.33	0.41	8.10
	MIROC6	0.04	10.10	0.04	8.41	0.61	6.16	0.60	5.04
	NorESM2-MM	0.66	6.03	0.64	4.77	0.76	4.84	0.73	3.84
زاهدان Zahedan	ACCESS-CM2	0.55	5.81	0.52	4.60	0.48	6.91	0.38	5.73
	CMCC-ESM2	0.45	6.42	0.43	5.33	0.45	8.77	0.15	7.62
	CNRM-CM6-1-HR	0.42	6.62	0.41	5.11	0.40	6.33	0.32	5.17
	CNRM-ESM2-1	0.48	6.24	0.47	4.81	0.49	6.36	0.37	5.18
	EC-Earth3-CC	0.58	5.63	0.56	4.31	0.43	6.14	0.41	4.87
	EC-Earth3-Veg-LR	0.58	5.65	0.59	4.47	0.44	6.08	0.40	4.87
	INM-CM4-8	0.50	6.14	0.47	5.05	0.43	6.17	0.43	5.00
	INM-CM5-0	0.53	5.95	0.52	4.88	0.44	6.10	0.45	4.95
	MIROC6	-1.38	13.39	-1.42	11.45	-0.58	10.26	-0.58	8.82
	NorESM2-MM	0.61	5.40	0.62	4.23	0.48	6.43	0.39	5.32

R^2، RMSE، NSE و MAE به‌ترتیب بیانگر ضریب تبیین، مجذور میانگین مربع خطا، کارایی نش-ساتکلیف و میانگین خطای مطلق می‌باشند.

R^2, RMSE, NSE, and MAE are correlation coefficient, root mean square error, Nash-Sutcliffe efficiency, and mean absolute error, respectively.

جدول ٤- شاخص‌های کارایی آماری ارزیابی داده‌های بارندگی مدل‌های اقلیمی

Table 4- Indicators of statistical performance in evaluating precipitation data from climate models

ایستگاه Station	مدل Model	R^2	RMSE (mm)	NSE	MAE (mm)
ایرانشهر Iranshahr	ACCESS-CM2	0.19	2.28	-1.15	0.38
	CMCC-ESM2	0.14	2.09	-0.78	0.46
	CNRM-CM6-1-HR	0.05	3.70	-4.72	0.71
	CNRM-ESM2-1	0.06	3.34	-3.64	0.64
	EC-Earth3-CC	0.13	2.14	-0.91	0.37
	EC-Earth3-Veg-LR	0.16	2.06	-0.78	0.42
	INM-CM4-8	0.17	2.00	-0.66	0.64
	INM-CM5-0	0.15	2.03	-0.71	0.65
	MIROC6	0.05	3.49	-4.08	0.85
	NorESM2-MM	0.09	2.35	-1.31	0.47
زابل Zabol	ACCESS-CM2	0.19	1.39	-0.57	0.27
	CMCC-ESM2	0.10	1.63	-1.14	0.37
	CNRM-CM6-1-HR	0.06	1.91	-3.38	0.38
	CNRM-ESM2-1	0.07	1.60	-2.07	0.30
	EC-Earth3-CC	0.11	1.30	-1.01	0.23
	EC-Earth3-Veg-LR	0.08	1.45	-1.50	0.25
	INM-CM4-8	0.12	1.58	-1.02	0.54
	INM-CM5-0	0.08	1.78	-1.56	0.43
	MIROC6	0.05	2.65	-7.41	0.67
	NorESM2-MM	0.12	1.60	-2.07	0.35
زاهدان Zahedan	ACCESS-CM2	0.14	1.24	-0.86	0.24
	CMCC-ESM2	0.08	1.44	-1.50	0.31
	CNRM-CM6-1-HR	0.03	3.05	-6.52	0.66
	CNRM-ESM2-1	0.05	2.65	-4.67	0.56
	EC-Earth3-CC	0.09	1.66	-1.22	0.36
	EC-Earth3-Veg-LR	0.16	1.49	-0.80	0.33
	INM-CM4-8	0.10	1.30	-1.04	0.33
	INM-CM5-0	0.08	1.49	-1.67	0.40
	MIROC6	0.02	2.45	-3.84	0.65
	NorESM2-MM	0.13	1.55	-0.95	0.35

R^2، RMSE، NSE و MAE به‌ترتیب بیانگر ضریب تبیین، مجذور میانگین مربع خطا، کارایی نش–ساتکلیف و میانگین خطای مطلق می‌باشند.

R^2, RMSE, NSE, and MAE are correlation coefficient, root mean square error, Nash-Sutcliffe efficiency, and mean absolute error, respectively.

تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی

تصحیح اریبی داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو، نیازمند انتخاب بهترین روش آماری جهت دستیابی به صحیح‌ترین نتایج برای پیش‌نگری‌های آینده تغییرات اقلیمی در هر منطقه است (Rashidi Ghane *et al.*, 2023). در بین روش‌های مختلف تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی هفت مدل موردمطالعه برای تمام مناطق، بهترین کارایی را روش نقشه‌برداری توزیع دما برای دمای حداقل و حداکثر و روش نقشه‌برداری توزیع بارش برای بارندگی داشت (جدول‌های ۵ و ۶). با استفاده از این روش‌ها، در هر سه منطقه موردمطالعه تغییرپذیری شبیه‌سازی‌های خام GCMs با موفقیت کاهش یافت و به داده‌های واقعی نزدیک‌تر شد. دامنه R^2، RMSE، NSE و MAE برای داده‌های تصحیح اریبی‌شده دمای حداکثر به‌ترتیب به ۰/۶۵ تا ۰/۸۴، ۳/۸۳ تا ۶/۱ درجه‌سانتی‌گراد، ۰/۶۳ تا ۰/۹۵ و ۲/۹۱ تا ۴/۴۹ درجه‌سانتی‌گراد و برای داده‌های تصحیح اریبی‌شده دمای حداقل به‌ترتیب به ۰/۴۳ تا ۰/۸۰، ۳/۵۵ تا ۶/۱۱ درجه‌سانتی‌گراد، ۰/۳۹ تا ۰/۸۱ و ۲/۵۷ تا ۴/۷۸ درجه‌سانتی‌گراد بهبود یافت (جدول ۵). برای داده‌های بارندگی، تصحیح اریبی با استفاده از روش نقشه‌برداری توزیع بارش باعث شد R^2 بین ۰/۳۵ تا ۰/۷۶، RMSE بین ۱/۰۲ تا ۱/۸۸ میلی‌متر، NSE بین ۰/۲۱ تا ۰/۶۹ و MAE بین ۰/۱۵ تا ۰/۵۱ میلی‌متر تغییر یابد (جدول ۶). باتوجه‌به حجم زیاد داده‌ها، نتایج مربوط به ارزیابی کارایی سایر مدل‌ها نشان داده نشده است. رشیدی قانع و همکاران (Rashidi Ghane *et al.*, 2023) در مطالعه‌ای توانمندی روش‌های مختلف تصحیح اریبی با CMhyd را موردبررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روش مقیاس‌گذاری خطی و نقشه‌برداری توزیع دما به‌ترتیب برای داده‌های بارش و دما از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها در ایستگاه‌های منتخب حوزه کشف‌رود برخوردار بودند. برارخان‌پور احمدی و همکاران (Bararkhanpour Ahmadi *et al.*, 2024) نیز روش‌های مختلف تصحیح اریبی با CMhyd را ارزیابی نموده و نشان دادند که روش‌های نقشه‌برداری توزیع دما و مقیاس‌گذاری واریانس از همبستگی بالاتری با داده‌های دمای حداقل و حداکثر ایستگاهی استان مازندران در دوره پایه برخوردار بودند. به‌منظور درک درست و پیش‌نگری شرایط اقلیم آینده کره زمین،

استفاده از نتایج ریزمقیاس‌نمایی و تصحیح اریبی‌شده مدل‌های گردش عمومی جو در مناطق مختلف دنیا توصیه می‌گردد. با کم شدن عدم قطعیت مدل‌ها و همچنین پیشرفت فناوری و افزایش قدرت پردازش رایانه‌ها، روزبه‌روز باید منتظر نتایج دقیق‌تر و پیش‌نگری‌های بهتر از این مدل‌ها بود (Rashidi Ghane *et al.*, 2023).

باتوجه‌به نتایج حاصل از ارزیابی روش‌های مختلف تصحیح اریبی (جدول‌های ۵ و ۶) از روش نقشه‌برداری توزیع دما و بارش جهت تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی در دوره‌های زمانی آینده استفاده شد. داده‌های تصحیح اریبی‌شده مدل‌های منتخب به‌صورت میانگین جهت ارزیابی میزان تغییرات در دوره‌های زمانی آینده مورداستفاده قرار گرفتند. چراکه باتوجه‌به تعدد مدل‌های اقلیمی و دسترسی آسان به داده‌های خروجی آن‌ها پیشنهاد می‌گردد جهت کاهش عدم قطعیت تا حدامکان از چندین مدل به‌جای یک مدل در مطالعات تغییر اقلیم استفاده شود (Yang *et al.*, 2021).

تغییر در متغیرهای اقلیمی

در هر سه منطقه، میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل در سه دوره آینده نسبت به دوره پایه با افزایش مواجه خواهد شد که این افزایش در سناریوی SSP5-8.5 بیشتر از سناریوی SSP2-4.5 خواهد بود (شکل‌های ۲ و ۳). میانگین سالانه دمای حداکثر در دوره آینده نزدیک، میانه و دور نسبت به دوره پایه در سناریوی SSP2-4.5 به‌ترتیب ۱/۱۳، ۱/۷۳ و ۲/۵۳ درجه‌سانتی‌گراد در ایرانشهر، ۱/۴۲، ۲/۲۳ و ۳/۱۷ درجه‌سانتی‌گراد در زابل و ۱/۲۸، ۲/۴۴ و ۲/۸۳ درجه‌سانتی‌گراد در زاهدان و در سناریوی SSP5-8.5 به‌ترتیب ۱/۳۸، ۲/۷۵ و ۴/۵۳ درجه‌سانتی‌گراد در ایرانشهر، ۱/۷۶، ۳/۵۶، ۵/۷۸ درجه‌سانتی‌گراد در زابل و ۱/۵۷، ۳/۱۵ و ۵/۱۲ درجه‌سانتی‌گراد در زاهدان افزایش خواهد یافت (شکل ۲).

میانگین سالانه دمای حداقل نیز در دوره آینده نزدیک، میانه و دور نسبت به دوره پایه در سناریوی SSP2-4.5 به‌ترتیب ۱/۴۰، ۲/۲۴ و ۲/۹۸ درجه‌سانتی‌گراد در ایرانشهر، ۱/۴۳، ۲/۱۹ و ۳/۱۲ درجه‌سانتی‌گراد در زابل و ۱/۸۷، ۳/۴۶ و ۴/۱۰ درجه‌سانتی‌گراد در زاهدان و در سناریوی SSP5-8.5 به‌ترتیب ۱/۷۲، ۳/۳۷ و ۵/۵۳ درجه‌سانتی‌گراد در ایرانشهر، ۱/۶۷، ۳/۵۷ و ۵/۸۷ درجه‌سانتی‌گراد در زابل و ۲/۲۲، ۴/۶۶ و ۷/۵۳ درجه‌سانتی‌گراد در زاهدان افزایش خواهد یافت (شکل ۳). افزایش قابل‌توجه دما در شرایط اقلیمی آینده ایران برای بخش‌های مختلف کشور در مطالعاتی مانند زرین و همکاران (Zarrin *et al.*, 2021) و نیازکار و همکاران (Niazkar *et al.*, 2023) نیز گزارش شده است. افزایش سالانه در میانگین دمای حداکثر و حداقل در این مطالعه عمدتاً ناشی از افزایش دمای هوا درماه‌های ژانویه، فوریه، آگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر خواهد بو (شکل‌های ۲ و ۳).

جدول ۵- شاخص‌های کارایی آماری تصحیح اریبی داده‌های دمای حداکثر و حداقل با استفاده از روش نقشه‌برداری توزیع دما

Table 5- Indicators of statistical performance for bias-corrected maximum and minimum temperature data using the distribution mapping of temperature

ایستگاه Station	مدل Model	دمای حداکثر Tmax R^2	RMSE (°C)	NSE	MAE (°C)	دمای حداقل Tmin R^2	RMSE (°C)	NSE	MAE (°C)
ایرانشهر Iranshahr	ACCESS-CM2	0.84	3.84	0.83	2.93	0.79	3.81	0.72	2.98
	CMCC-ESM2	0.82	3.88	0.8	2.93	0.78	3.95	0.64	3.05
	EC-Earth3-CC	0.81	3.83	0.78	2.91	0.8	3.77	0.79	2.9
	EC-Earth3-Veg-LR	0.83	3.87	0.81	2.98	0.79	3.85	0.76	3.01
	INM-CM4-8	0.8	3.96	0.79	3.00	0.78	3.97	0.71	3.05
	INM-CM5-0	0.8	3.94	0.81	3.05	0.79	3.89	0.73	2.99
	NorESM2-MM	0.75	4.37	0.75	3.34	0.73	4.36	0.75	3.42
زابل Zabol	ACCESS-CM2	0.68	4.95	0.68	3.79	0.79	3.55	0.81	2.57
	CMCC-ESM2	0.82	4.92	0.68	3.8	0.78	4.6	0.76	3.61
	EC-Earth3-CC	0.7	4.33	0.95	3.69	0.79	4.49	0.78	3.53
	EC-Earth3-Veg-LR	0.77	4.85	0.69	3.74	0.8	4.45	0.81	3.49
	INM-CM4-8	0.8	5.02	0.67	3.83	0.78	4.66	0.77	3.62
	INM-CM5-0	0.82	4.95	0.68	3.83	0.78	4.61	0.61	3.62
	NorESM2-MM	0.73	5.28	0.63	4.06	0.74	5.01	0.63	3.95
زاهدان Zahedan	ACCESS-CM2	0.71	5.56	0.67	4.32	0.51	5.71	0.5	4.43
	CMCC-ESM2	0.71	5.53	0.7	4.31	0.49	5.79	0.43	4.49
	EC-Earth3-CC	0.73	5.38	0.72	4.00	0.53	5.59	0.52	4.43
	EC-Earth3-Veg-LR	0.72	5.43	0.69	4.24	0.51	5.73	0.48	4.42
	INM-CM4-8	0.69	5.68	0.70	4.41	0.48	5.89	0.44	4.53
	INM-CM5-0	0.68	5.77	0.67	4.49	0.51	5.72	0.39	4.38
	NorESM2-MM	0.65	6.10	0.63	4.04	0.43	6.11	0.71	4.78

R^2، RMSE، NSE و MAE به‌ترتیب بیانگر ضریب تبیین، مجذور میانگین مربع خطا، کارایی نش-ساتکلیف و میانگین خطای مطلق می‌باشند.

R^2, RMSE, NSE, and MAE are correlation coefficient, root mean square error, Nash-Sutcliffe efficiency, and mean absolute error, respectively.

جدول ٦- شاخص‌های کارایی آماری تصحیح اریبی داده‌های بارندگی با استفاده از روش نقشه‌برداری توزیع بارش

Table 6- Indicators of statistical performance for bias-corrected precipitation data using the distribution mapping of precipitation

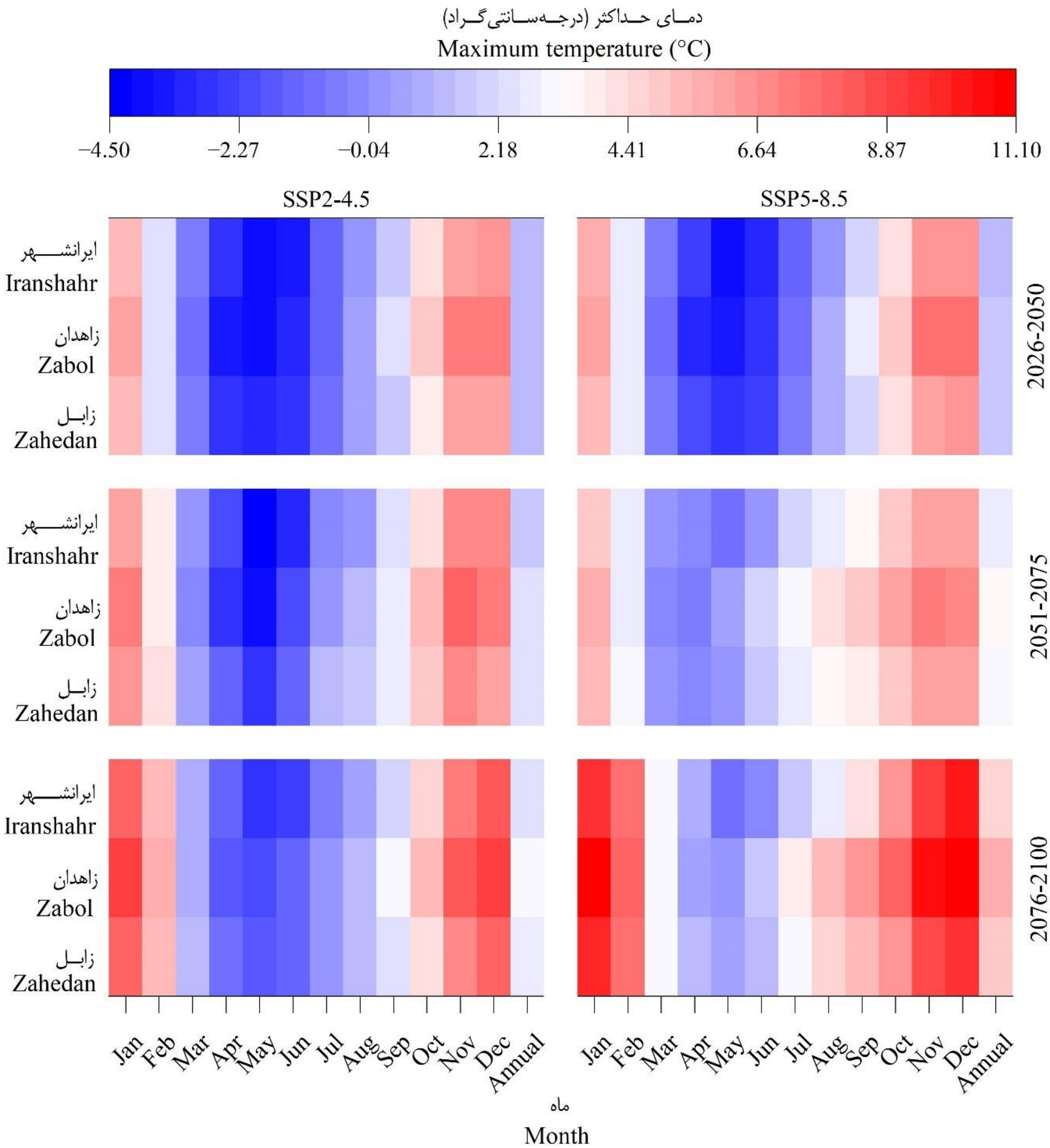
ایستگاه Station	مدل Model	R^2	RMSE (mm)	NSE	MAE (mm)
ایرانشهر Iranshahr	ACCESS-CM2	0.58	1.04	0.62	0.26
	CMCC-ESM2	0.53	1.24	0.48	0.34
	EC-Earth3-CC	0.62	1.69	0.61	0.25
	EC-Earth3-Veg-LR	0.66	1.88	0.63	0.31
	INM-CM4-8	0.66	1.21	0.69	0.5
	INM-CM5-0	0.35	1.50	0.34	0.46
	NorESM2-MM	0.52	1.46	0.50	0.39
زابل Zabol	ACCESS-CM2	0.49	1.03	0.43	0.15
	CMCC-ESM2	0.44	1.21	0.29	0.27
	EC-Earth3-CC	0.44	1.02	0.21	0.16
	EC-Earth3-Veg-LR	0.69	1.23	0.55	0.18
	INM-CM4-8	0.46	1.3	0.42	0.21
	INM-CM5-0	0.47	1.11	0.4	0.35
	NorESM2-MM	0.76	1.31	0.37	0.19
زاهدان Zahedan	ACCESS-CM2	0.54	1.13	0.27	0.18
	CMCC-ESM2	0.51	1.2	0.23	0.29
	EC-Earth3-CC	0.46	1.21	0.34	0.24
	EC-Earth3-Veg-LR	0.63	1.14	0.6	0.21
	INM-CM4-8	0.43	1.11	0.38	0.43
	INM-CM5-0	0.54	1.03	0.31	0.51
	NorESM2-MM	0.43	1.24	0.42	0.22

R^2، RMSE، NSE و MAE به‌ترتیب بیانگر ضریب تبیین، مجذور میانگین مربع خطا، کارایی نش-ساتکلیف و میانگین خطای مطلق می‌باشند.

R^2, RMSE, NSE, and MAE are correlation coefficient, root mean square error, Nash-Sutcliffe efficiency, and mean absolute error, respectively.

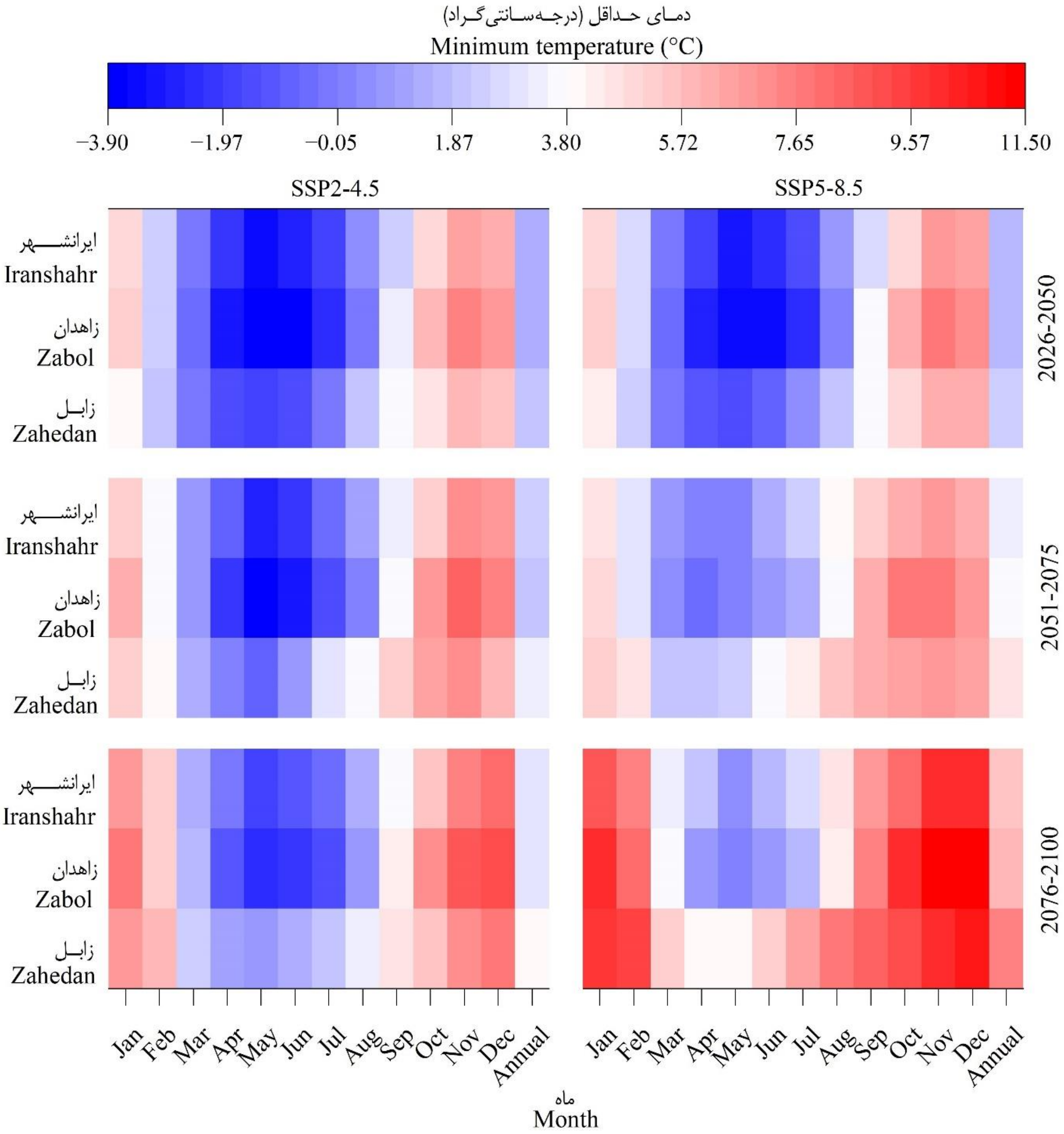
مجموع بارندگی سالانه در دوره آینده نزدیک، میانه و دور نسبت به دوره پایه در سناریوی SSP2-4.5 به‌ترتیب ۱۴/۶۵، -۴/۸۴ و ۱۸/۲۸ درصد در ایرانشهر، -۳۹/۵۶، -۸/۸۹ و -۳۳/۷۸ درصد در زابل و -۲۴/۰۹، ۳/۱۷ و -۱۴/۴۲ درصد در زاهدان و در سناریوی SSP5-8.5 به‌ترتیب -۱۵/۱۹، -۲۱/۱۰ و ۴۹/۳۳ درصد در ایرانشهر، -۵۸/۲۲، -۲۵/۷۸ و -۲۰/۸۹ درصد در زابل و -۴۰/۱۰، -۳۹/۶۲ و ۴/۱۲ درصد در زاهدان تغییر پیدا خواهد کرد (شکل ۴). کاهش سالانه بارندگی عمدتاً از کاهش بارندگی درماه‌های ژانویه، فوریه، مارچ، نوامبر و دسامبر و افزایش سالانه بارندگی از افزایش قابل‌توجه بارندگی در ماه‌های می و اکتبر نسبت به دوره پایه ناشی خواهد شد (شکل ۴). به‌عبارت‌دیگر بارندگی در آینده نسبت به دوره پایه عمدتاً در فصول پاییز و زمستان کاهش و در فصول بهار و تابستان افزایش خواهد یافت. کوچکی و همکاران (Koocheki *et al*., 2022) نیز در مطالعه‌ای افزایش میزان بارندگی در ماه‌های خشک سال (جولای تا سپتامبر) را در اکثر مناطق کشور در دوره‌های آتی پیش‌بینی نمودند. زارعیان (Zareian, 2022) نیز در مطالعه‌ای بیان داشتند که بیشترین میزان کاهش بارندگی در شهرهای مختلف استان یزد در فصل پاییز رخ خواهد داد. بااین‌حال، حمیدیان‌پور و حجازی‌زاده (Hamidianpour & Hejazizadeh, 2012) افزایش بارندگی در فصل زمستان و کاهش بارندگی در فصل تابستان را در شهرهای زابل، زاهدان و چابهار برای دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ با استفاده از داده‌های مدل‌های CMIP3 گزارش نمودند. اختلاف نتایج این مطالعه با تحقیق حاضر ناشی از تفاوت در دوره‌های زمانی و داده‌های اقلیمی موردمطالعه می‌باشد.

در بین مناطق موردبررسی، زابل بیشترین میزان تغییر در دمای حداکثر و بارندگی سالانه و زاهدان بیشترین میزان تغییر در دمای حداقل را در آینده تجربه خواهند کرد (شکل‌های ۲-۴). این امر می‌تواند ناشی از عرض جغرافیایی بالاتر زابل و ارتفاع بیشتر زاهدان باشد (شکل ۱). در مطالعه‌ای یانگ و همکاران (Yang *et al*., 2021) نشان دادند که مناطق با ارتفاع بیشتر و در عرض جغرافیایی بالاتر، تغییرات بیشتری را در دما و بارندگی در آینده تجربه خواهند کرد.



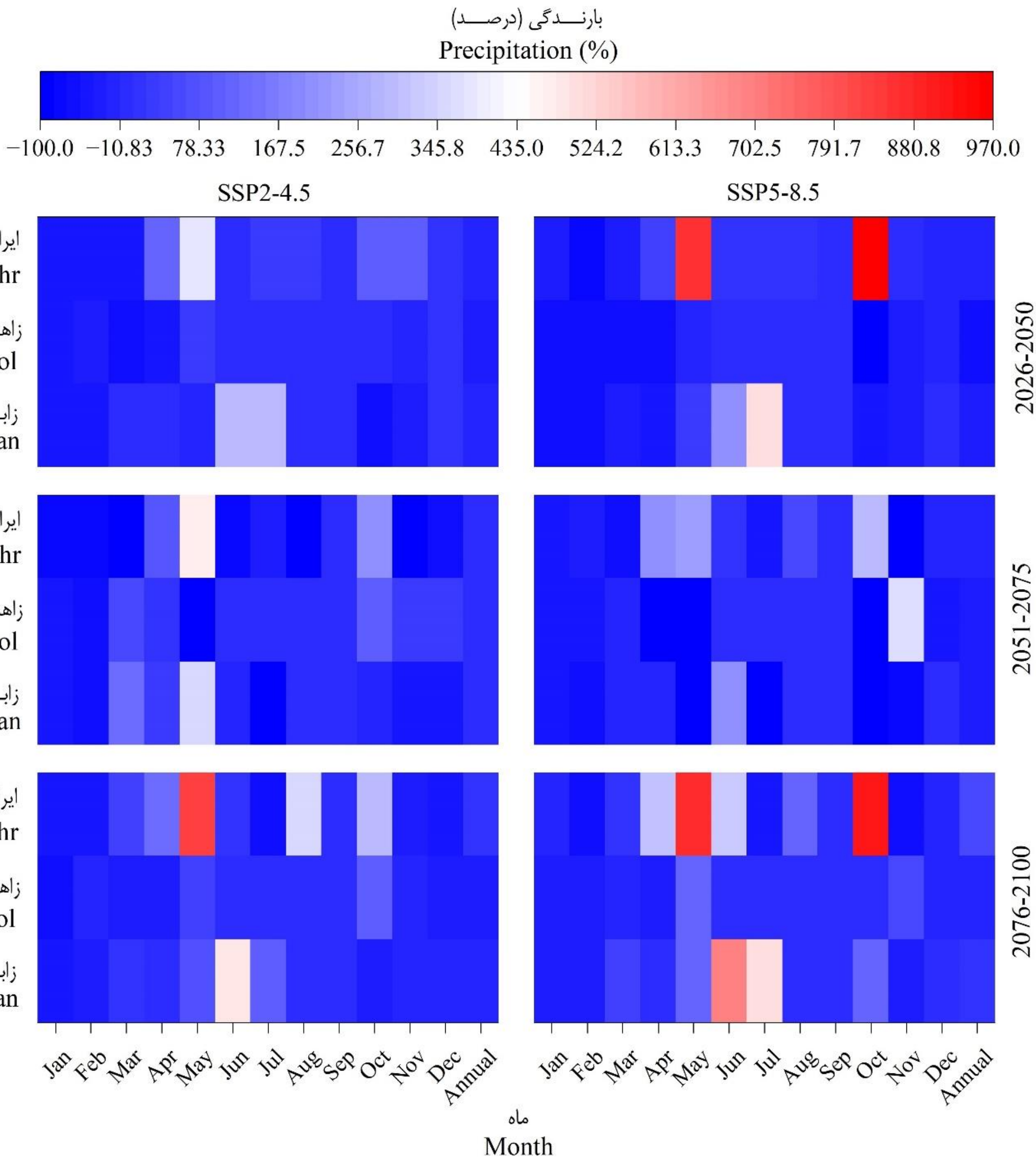
شکل ۲- تغییرات پیش‌بینی‌شده دمای حداکثر ماهانه و سالانه در سه دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 2- Projected changes of monthly and annual maximum temperature in the 2026–2050, 2051-2075, and 2076–2100 relative to the baseline period (1990–2014) under SSP2–4.5 and SSP5–8.5 emission scenarios



شکل ۳- تغییرات پیش‌بینی‌شده دمای حداقل ماهانه و سالانه در سه دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 3- Projected changes of monthly and annual minimum temperature in the 2026–2050, 2051-2075, and 2076–2100 relative to the baseline period (1990–2014) under SSP2–4.5 and SSP5–8.5 emission scenarios



شکل ٤- تغییرات پیش‌بینی‌شده بارندگی ماهانه و سالانه در سه دوره ۲۰۵۰-۲۰۲٦، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷٦ نسبت به دوره پایه (۲۰۱٤-۱۹۹۰) برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 4- Projected changes of monthly and annual maximum precipitation in the 2026–2050, 2051-2075, and 2076–2100 relative to the baseline period (1990–2014) under SSP2–4.5 and SSP5–8.5 emission scenarios

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد کـه مـدل‌هـای CMIP6 کارایی خوبی در شبیه‌سازی دمای حداقل و حداکثر و کارایی ضـعیفی در شبیه‌سازی بارندگی روزانه در سه منطقه زابل، زاهـدان و ایرانشــهر دارند. بااین‌حال، تصحیح اریبی داده‌های مدل‌های اقلیمی سبب بهبود کارایی خروجی‌های مـدل‌هـای اقلیمـی گردیـد و در بـین روش‌هـای مختلف موجود در CMhyd، روش نقشه‌بـرداری توزیـع دمـا و بـارش کارایی بهتری در تصحیح اریبی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی داشتند.

همچنین نتایج نشان داد که تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، دمای حداکثر و حداقل در دوره‌های آینده نزدیک، میانـه و دور نسـبت به دوره پایه با افزایش مواجه خواهد شد که این افزایش در مـاه‌هـای سرد سال (فصل‌های پاییز و زمستان) بیشـتر از مـاه‌هـای گـرم سـال خواهد بود. بااین‌حال، تغییرات بارندگی در دوره‌های زمـانی آینـده بـه

یک شکل نبوده و در برخی دوره‌ها شاهد کاهش و برخی شاهد افزایش بارندگی نسبت به دوره پایه خواهیم بود. اما در حالت کلی میزان کاهش بارندگی بیشتر از افزایش آن خواهد بود. لذا ازآن‌جایی‌که مناطق موردمطالعه دارای اقلیم خشک بوده احتمالاً در آینده با مشکلات متعددی در زمینه تأمین منابع آب لازم برای بخش‌های مختلف مواجه خواهند شد. درنتیجه تدوین و اجرای برنامه‌های مدیریتی مناسب در راستای نیاز هر منطقه، به‌منظور مدیریت مناسب منابع آب و سازگاری با دماهای حدی و عواقب آن، اهمیت بسیار دارد.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت‌های مالی پژوهشگاه زابل مستخرج از طرح پژوهشی با کد PR-RIOZ-1402-5504-1 اجرا گردیده است که بدین‌وسیله قدردانی می‌گردد.

References

1. Abdolalizadeh, F., Mohammad Khorshiddoust, A., & Jahanbakhsh, S. (2023). Projection of the future outlook of temperature and precipitation in Urmia Lake basin by the CMIP6 models. *Physical Geography Research*, *55*(1), 95-112. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jphgr.2023. 352727.1007737
2. Ashraf, B., Alizade, A., Mousavi Baygi, M., Bannayan Aval, M. (2013). Verification of temperature and precipitation simulated data by individual and ensemble performance of five AOGCM models for North East of Iran. *Journal of Water and Soil*, *28*(2), 253-266. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.38011.
3. Bağçaci, S.Ç., Yucel, I., Duzenli, E., & Yilmaz, M.T. (2021). Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, *256*, 105576. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105576
4. Bararkhanpour Ahmadi, S., Nadi, M, Mazloom Babanari, S., & Jedariforoughi, A. (2024). Analyzing the effect of climate change on the trend of extreme temperatures along the coast of Mazandaran province based on CMIP6 models. *Journal of Water and Soil Conservation, 30*(4), 1-27. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/jwsc.2023.21185.3635
5. Faisal, A.A., Taha, D.S., Hassan, W.H., Lakhera, S.K., Ansar, S., & Pradhan, S. (2023). Subsurface flow constructed wetlands for treating of simulated cadmium ions-wastewater with presence of *Canna indica* and *Typha domingensis*. *Chemosphere*, *338*, 139469. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139469
6. GhorbaniMinaei, L., Mosaedi, A., Zakerinia, M., Kalbali, E., & Ghabaei Soogh, M. (2024). Study of future climate change on the temperature and precipitation trends in Qarasu basin based on the CMIP6 models. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *55*(2), 245-268. (In Persian with English abstract)
7. Hamidianpour, M., & Hejazizadeh, Z. (2012). Investigating changes in temperature and precipitation using the atmospheric general circulation model, a case study of Sistan-va-Baluchestan province. National Congress on Border Cities and Security; Challenges and Strategies–CBCS, Sistan-va-Baluchestan University, Zahedan, Iran. (In Persian)
8. Hassan, W.H., Nile, B.K., Mahdi, K., Wesseling, J., & Ritsema, C. (2021). A feasibility assessment of potential artificial recharge for increasing agricultural areas in the Karbala desert in Iraq using numerical groundwater modeling. *Water*, *13*(22), 3167. https://doi.org/10.3390/w13223167
9. IPCC. (2020). The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
10. Kamworapan, S., Thao, P.T.B., Gheewala, S. H., Pimonsree, S., & Prueksakorn, K. (2021). Evaluation of CMIP6 GCMs for simulations of temperature over Thailand and nearby areas in the early 21st century. *Heliyon*, *7*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08263
11. Koocheki, A., Mahallati, M.N., Bannayan, M., & Yaghoubi, F. (2022). Simulating resilience of rainfed wheat–based cropping systems of Iran under future climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *27*(4), 27. https://doi.org/10.1007/s11027-022-09996-3
12. Kouhi, M., Mousavi Baygi, M., Farid hosseini, A.R., Sanaei Nejad, S.H., & Jabbari Nooghabi, H. (2012). Statistical downscaling of extremes of precipitation and construction of their future scenarios in the Kashfroud Basin. *Journal of Climate Research*, *1391*(12), 35-53. (In Persian with English abstract)
13. Mianabadi, A., Bateni, M.M., & Mohammadi, S. (2023). Projection of change in the distribution of precipitation and temperature using bias-corrected simulations of CMIP6 climate models (Case study: Kerman synoptic station). *Journal of Climate Change Research*, *4*(13), 65-84. (In Persian with English abstract)
14. Mohsen, K.A., Nile, B.K., & Hassan, W.H. (2020). Experimental work on improving the efficiency of storm networks using a new galley design filter bucket. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 671, No. 1. IOP Publishing, 012094.

15. Monteverde, C., De Sales, F., & Jones, C. (2022). Evaluation of the CMIP6 performance in simulating precipitation in the Amazon River basin. *Climate*, *10*(8), 122. https://doi.org/10.3390/cli10080122
16. Muhaisen, N.K., Khayyun, T.S., Al Mukhtar, M., & Hassan, W.H. (2024). Forecasting changes in precipitation and temperatures of a regional watershed in Northern Iraq using LARS-WG model. *Open Engineering*, *14*(1), 20220567.
17. Mukheef, R.A., Hassan, W.H., & Alquzweeni, S. (2024). Projections of temperature and precipitation trends using CMhyd under CMIP6 scenarios: A case study of Iraq's Middle and West. *Atmospheric Research*, *306*, 107470. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107470
18. Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, *10*(3), 282-290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6
19. Niazkar, M., Goodarzi, M.R., Fatehifar, A., & Abedi, M.J. (2023). Machine learning-based downscaling: application of multi-gene genetic programming for downscaling daily temperature at Dogonbadan, Iran, under CMIP6 scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, *151*(1), 153-168.
20. Rashid, H., Yang, K., Zeng, A., Ju, S., Rashid, A., Guo, F., & Lan, S. (2021). Predicting the hydrological impacts of future climate change in a humid-subtropical watershed. *Atmosphere*, *13*(1), 12. https://doi.org/10.3390/atmos 13010012
21. Rashidi Ghane, M., Motevalli, S., janbaz Ghobadi, G.R., & Kouhi, M. (2023). Evaluation of the ability of three statistical methods to downscale the output of temperature and precipitation of CMIP6 models in the Kashfrud basin. *Journal of Climate Research*, *1402*(53), 117-132. (In Persian with English abstract)
22. Taylor, K.E. (2005). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal Geophysics Research*, *106*, 7183-7192, http://wwwpcmdi.llnl.gov/publications/ab55.html
23. Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, *456*, 12-29.
24. Van Wart, J., Grassini, P., Yang, H., Claessens, L., Jarvis, A., & Cassman, K.G. (2015). Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, *209*, 49-58. https://doi.org/ 10.1016/j.agrformet.2015.02.020
25. Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, *2*(2), 184-194. https://doi.org/10.1080/ 02723646.1981.10642213
26. Yang, X., Zhou, B., Xu, Y., & Han, Z. (2021). CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, *38*, 817-830. https://doi.org/10.1007/s00376-021-0351-4
27. Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, *250*, 105369. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105369
28. Zareian, M. (2022). Effects of climate change on temperature and precipitation in Yazd province based on combined output of CMIP6 models. *JWSS-Isfahan University of Technology*, *26*(2), 91-105. (In Persian with English abstract)
29. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Evaluation of CMIP6 models in estimating temperature in Iran with emphasis on equilibrium climate sensitivity (ECS) and transient climate response (TCR). *Iranian Journal of Geophysics*, *17*(1), 39-56. (In Persian with English abstract)
30. Zarrin, A., Dadashi-Rodbari, A., & Salehabadi, N. (2021). Projected temperature anomalies and trends in different climate zones in Iran based on CMIP6. *Iranian Journal of Geophysics*, *15*(1), 35-54. https://doi.org/ 10.30499/ijg.2020. 249997.1292